

แนวทางการออกแบบหลังคาโค้งที่ใช้วัสดุเหล็กรีดลอนโดยไม่ตัด

Guidelines for Designing Curved Roofs Using non-bended Metal

Sheets

รับบทความ	03/07/2566
แก้ไขบทความ	18/09/2566
ยอมรับบทความ	19/09/2566

ณัฐยานี แสงงาม
ภาควิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Nuttaya Sang-ngam
Department of Architecture, Faculty of Architecture, Chulalongkorn University
aung.nuttaya@gmail.com

บทคัดย่อ

หลังคาเป็นส่วนปกคลุมอาคาร มีหน้าที่ป้องกันแดดและฝน รูปแบบหลังคามาจากโครงสร้างและวัสดุ สำหรับอาคารโครงสร้างที่มีช่วงกว้าง เช่น โรงงาน และคลังเก็บสินค้า มักนิยมใช้วัสดุมาจากแผ่นเหล็กรีดลอน เพราะมีคุณสมบัติ บางเบา และมีหลายรูปแบบ ทั้งแผ่นตรงธรรมดา แผ่นตรงแบบสอป แผ่นโค้งธรรมดา แผ่นโค้งแบบสอป แผ่นโค้งตัด และแผ่นโค้งสองทิศทาง จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่า การผลิตแผ่นโค้งมีกระบวนการผลิตที่ซับซ้อน ซึ่งส่งผลต่อระยะเวลาและค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้น จึงมีวัตถุประสงค์ศึกษาสภาพปัจจุบันและปัญหา เพื่อเสนอแนวทางการออกแบบหลังคาโค้ง

การศึกษานี้ได้เลือกอาคาร 13 หลัง เป็นกรณีศึกษา พบว่ามีอาคารที่ใช้แผ่นโค้งแบบไม่ตัด จำนวน 5 หลัง และแบบตัด จำนวน 8 หลัง จากนั้นนำส่วนโค้งของหลังคาจากแบบสถาปัตย์กรรมมาวิเคราะห์ พบว่าแปรผันตามรัศมีของผลิตภัณฑ์แผ่นหลังคา ซึ่งระบุความสามารถความโค้งไม่ตัดได้ในมาตรฐานคู่มือผลิตภัณฑ์

จากการศึกษาทำให้ทราบว่าข้อจำกัดความโค้งมาจากขนาดที่ดิน ความต้องการพื้นที่ใช้สอย และความงาม พบว่าขนาดที่ดินและความต้องการพื้นที่ใช้สอยมีความสัมพันธ์กับความกว้างของอาคาร ความต้องการพื้นที่ใช้สอยมีความสัมพันธ์กับความสูงของอาคาร และความงามมีความสัมพันธ์กับรูปทรงของอาคารที่ส่งผลต่อรัศมีของหลังคา

ผลการศึกษานำมาสู่การสังเคราะห์แนวทางการใช้แผ่นโค้งธรรมดาโดยไม่ตัด 2 วิธี วิธีที่ 1 หากความโค้งถูกกำหนดจากความกว้าง ให้ลดความสูงของหลังคา ที่วัดจากระยะส่วนปลายของหลังคาถึงระยะส่วนที่สูงสุดของหลังคา และวิธีที่ 2 หากความโค้งถูกกำหนดจากความสูง ที่วัดจากระยะส่วนปลายของหลังคาถึงระยะส่วนที่สูงสุดของหลังคา ให้เพิ่มความกว้างส่วนชายคาของหลังคา สำหรับกรณีความโค้งของหลังคาเกิดจากความต้องการใช้พื้นที่ใช้สอยได้หลังคา เสนอให้เพิ่มความสูงของตัวอาคาร โดยลดความสูงที่วัดจากระยะส่วนปลายของหลังคาถึงระยะส่วนที่สูงสุดของหลังคา เพื่อปรับรัศมีของเส้นโค้งให้เป็นไปตามรัศมีผลิตภัณฑ์ จะสามารถใช้แผ่นหลังคาโค้งแบบไม่ตัด โดยค่าวัสดุเหล็กรีดลอนแผ่นโค้งแบบตัดจะมีค่าใช้จ่ายมากกว่าแผ่นโค้งไม่ตัด 54%

คำสำคัญ: วัสดุหลังคา เหล็กรีดลอน หลังคาโค้ง โค้งไม่ตัด เหล็กรีดลอนไม่ตัด

Abstract

The roof is the covering of a building. Its function is to protect from the sun and rain. Roof styles derive from the structure and roofing materials. For structural buildings with wide spans such as factories and warehouses. Metal sheets are often used as a roofing material because of properties such as being thin, lightweight and having various for examples, forms. Parallel straight sheet, Tapered Straight sheet, Parallel smooth curve sheet, Tapered smooth curve sheet, Crimp curved sheet and S-curved sheet. From this preliminary study, it was found that the production of curved sheets has a complex process. This results in long time construction and cost. Therefore, the objective is to study the current situation and problems for designing curved roofs using metal sheets as material.

In this research, 13 buildings were analyzed. It was observed that 5 of them used non-bended and 8 used bended metal sheets for their roofs. The curvatures of the roofs were then analyzed based on the radius specified in the product manuals, which dictate the non-bending curvature capacity.

The study found that the factors determining curvature include land size, functional requirements, and aesthetic appeal. Land size and functional requirements correlate with the building's width, while the latter also relates to building height. Aesthetic considerations, on the other hand, influence the roof's radius.

Two proposed approaches emerged from the study. The first approach suggests that if curvature is based on width, the roof's height—measured from its tip to its highest point—should be reduced. The second approach, for curvatures based on height, advises increasing the width of the roof's eaves. If the roof's curvature is influenced by its functional requirements, it is recommended to increase the building's height by adjusting the height from the roof's tip to its apex, aligning the curve's radius with the product model. This would enable the use of non-bending curved sheets. Cost analysis revealed that bending curved sheets are 54% more expensive than non-bending ones.

Keywords: *roof material, metal sheet, vaulted roof, sprung curved metal sheet*

บทนำ

หลังคาเป็นส่วนสำคัญของอาคาร ทำหน้าที่เป็นส่วนปกคลุมอาคาร เพื่อป้องกันแดด ฝน และเนื่องจากหลังคาสามารถมองเห็นได้ชัดเจนจากภายนอก จึงมีการออกแบบและเลือกใช้วัสดุที่แตกต่างกัน ทำให้หลังคามีหลายรูปแบบ (สุภาวดี รัตนมาศ, 2543) ไม่ว่าจะเป็น หลังคาแบน หลังคาเอียง หลังคาโค้ง และหลังคารูปทรงอิสระ จากการศึกษาพบรูปแบบหลังคามาจากโครงสร้างและวัสดุ โดยวัสดุเมื่อนั้นมีด้วยกันหลายชนิด ได้แก่ วัสดุธรรมชาติ ไฟเบอร์ซีเมนต์ คอนกรีต เซรามิก วัสดุสังเคราะห์ และโลหะ ซึ่งแต่ละชนิดจะมีขนาดและคุณสมบัติเฉพาะตัวที่แตกต่างกัน (สุภาวดี บุญยฉัตร, 2557) สำหรับวัสดุเมหลังคาประเภทโลหะ จะมีความแข็งแรง เหนียว และยืดหยุ่นสูง ที่มีขายในท้องตลาดทั่วไป คือ ทองแดง อลูมิเนียม สังกะสี และเหล็กรีดลอน (ศรายุทธ ศรีทิพย์อาสน์, 2554)

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 1128-2535 ให้บทนิยามของแผ่นเหล็กรีดลอนไว้ว่า “วัสดุแผ่นมีลอนแบบเกาะเกี่ยวหรือแบบอื่น ๆ ที่คล้ายกัน สำหรับใช้เมหลังคา ทำจากเหล็กแผ่นรีดเย็นที่นำมาเคลือบด้วยวัสดุที่ทนทานต่อสภาวะอากาศ ขึ้นรูป แล้วยึดด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ เข้ากับโครงหลังคา” (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 1843 เรื่อง กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม แผ่นเหล็กเมหลังคา, 2535) ความหนาของแผ่นเหล็กที่ไม่รวมความหนาของผิวเคลือบต้องไม่น้อยกว่า 0.40 มิลลิเมตร โดยเหล็กแผ่นรีดเย็นจะถูกเคลือบด้วยโลหะ เพื่อป้องกันการกัดกร่อนหรือการเกิดสนิม และมีการเคลือบสีทั้งด้านบนและด้านล่างของแผ่น (ธนพล ไกรงาม, 2562)

ที่ผ่านมาผู้ศึกษาเกี่ยวกับเหล็กรีดลอน ประเภทต่าง ๆ ได้แก่ พงษ์ศักดิ์ ลอยฟ้า (2550) ศึกษาเรื่อง ประสิทธิภาพในการลดความร้อนของหลังคาโลหะด้วยการใช้หลังคาสองชั้น ปรมารณ พูลสวัสดิ์ (2560) ศึกษาเรื่อง คุณสมบัติในการกันเสียงของแผ่นเหล็กเมหลังคาด้วยวัสดุพอลิเมอร์ชนิดอีลาสโตเมอร์โฟม (ฉนวนยางดำ) และธนพล ไกรงาม (2562) ศึกษาเรื่อง สมรรถนะการใช้งานและประสิทธิภาพด้านพลังงานของแผ่นหลังคาเหล็กที่มีระบบการเคลือบสีแตกต่างกัน ให้ความเห็นตรงกันว่า “เหล็กรีดลอนเป็นวัสดุที่ใช้งานกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน” โดยเราสามารถใช่แผ่นเหล็กรีดลอนในอาคารที่มีโครงสร้างช่วงกว้างได้หลายประเภท เช่น อาคารสนามบิน อาคารศูนย์การค้า อาคารหอประชุม อาคารโรงงาน อาคารโกดัง อาคารคลังสินค้า เป็นต้น เนื่องจากทนทานต่อการกัดกร่อน น้ำหนักเบากว่ากระเบื้องคอนกรีตเมหลังคา และมีช่วงพาดที่กว้าง (กันติพิต ทับสุวรรณ และคณะ, 2562)

ปัจจุบันแผ่นเหล็กรีดลอนที่พบในท้องตลาดมีหลายประเภท แบ่งตามระบบการติดตั้งได้ 3 ระบบ คือ ระบบยึดสกรู ระบบขบ-ล็อก และระบบรัดตะเข็บ (สุภาวดี รัตนมาศ, 2543) ซึ่งในแต่ละระบบมีลักษณะแผ่นเหล็กรีดลอนทั้งเหมือนและแตกต่างกัน เช่น แผ่นตรงธรรมดา แผ่นตรงแบบสอบ แผ่นโค้งธรรมดา แผ่นโค้งแบบสอบ แผ่นโค้งดัด และแผ่นโค้งสองทิศทาง โดยสามารถสรุปลักษณะแผ่นเหล็กรีดลอน ตามโครงสร้างได้ 2 รูปแบบ คือ แบบตรงและแบบโค้ง (Salvadori, 1963)

จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่า การผลิตแบบโค้งมีกระบวนการผลิตที่ซับซ้อน รวมถึงข้อจำกัดในการผลิต ซึ่งโค้งไม่ตัดมาจากวิธีการคำนวณความสามารถตามการแอ่นธรรมชาติของวัสดุที่จะทำให้เกิดเส้นโค้ง พบปัญหาการปรับรูปแบบหลังคาและโครงสร้าง ตลอดจนนำไปสู่การผลิตใหม่ ซึ่งส่งผลต่อระยะเวลาและค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้น จากปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยจึงมีความประสงค์จะศึกษาแนวทางการออกแบบหลังคาโค้งที่ใช้วัสดุเหล็กรีดลอน

วัตถุประสงค์ของการศึกษา

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ในการวิจัยเพื่อศึกษาสภาพปัจจุบันของหลังคาเหล็กรีดลอน โดยเลือกอาคารโครงสร้างช่วงกว้าง ออกแบบโดยภาครัฐและเอกชนที่ส่งแบบมาผลิตที่โรงงานเป็นกรณีศึกษา จำนวน 13 อาคาร เนื่องจากมีแบบสถาปัตยกรรมที่สามารถเปิดเผยได้ ซึ่งสรุปได้ดังนี้

1. เพื่อศึกษาสภาพปัจจุบันของหลังคาโค้งที่ใช้วัสดุเหล็กรีดลอนในปัจจุบัน
2. เพื่อหาแนวทางวิธีการกำหนดค่าความโค้งของวัสดุเหล็กรีดลอนเพื่อใช้ออกแบบหลังคาที่เหมาะสม

ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาเฉพาะอาคารที่มีหลังคาโค้งที่ใช้วัสดุเหล็กรีดลอนเท่านั้น
2. ศึกษาเฉพาะแผ่นหลังคาเหล็กรีดลอนที่มีความหนาที่เนื้อเหล็ก ความหนาที่ 0.42 มิลลิเมตร รุ่นTD760 เท่านั้น
3. ศึกษาเฉพาะส่วนของเส้นโค้งของหลังคาโค้งเท่านั้น

ระเบียบของการวิจัย

การศึกษาและรวบรวมข้อมูล แบ่งเป็น ข้อมูลปฐมภูมิและข้อมูลทุติยภูมิ ใช้วิธีการสังเกตการณ์จากสถานที่จริง ถ่ายภาพ จดบันทึก และสัมภาษณ์ผู้เกี่ยวข้องของโรงงานผู้ผลิตแผ่นเหล็กรีดลอน เพื่อทราบรายละเอียด ขั้นตอนของการผลิต การกำหนดค่าความโค้งของแผ่นที่ใช้ในการผลิต รวมถึงศึกษาค่าความโค้งของแผ่นหลังคาโค้งที่ใช้วัสดุเหล็กรีดลอนจากแบบสถาปัตยกรรม โดยศึกษาอาคารที่ออกแบบโดยภาครัฐและเอกชนที่ส่งแบบมาผลิตที่โรงงานเป็นกรณีศึกษา จำนวน 13 อาคาร สัมภาษณ์ผู้ออกแบบและผู้เกี่ยวข้อง ในส่วนของข้อมูลทุติยภูมิ ศึกษาข้อมูลจากหนังสือ งานวิจัยและวิทยานิพนธ์ที่เกี่ยวข้องกับหลังคาโค้ง วัสดุหลังคาเหล็กรีดลอน เมื่อศึกษาและรวบรวมข้อมูลจากการสังเกตการณ์ การสัมภาษณ์จากโรงงานผู้ผลิต และข้อมูลจากอาคารกรณีศึกษา จึงนำข้อมูลทั้งหมดมาประมวลผล พิจารณา วิเคราะห์ เปรียบเทียบ และสรุปอภิปรายผลเพื่อนำเสนองานวิจัย

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทั้งนี้ ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับในงานวิจัย เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานแนวทางพัฒนาการออกแบบหลังคาโค้งที่ใช้วัสดุเหล็กรีดลอน เพื่อทราบถึงวิธีการออกแบบหลังคาโค้ง การกำหนดค่าความโค้งของหลังคาโค้งที่ใช้วัสดุเหล็กรีดลอนโดยไม่ต้องตัดที่เหมาะสมต่อไป

การทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทบทวนวรรณกรรม

ทบทวนวรรณกรรมพบว่า การศึกษาเกี่ยวกับวัสดุแผ่นเหล็กรีดลอนที่ผ่านมาในประเทศไทย พบการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบจากการใช้แผ่นเหล็กรีดลอนในงานสถาปัตยกรรม เรื่องของการป้องกันเสียง เรื่องของการลดความร้อน ดังนี้ วิทยานิพนธ์ เรื่อง การศึกษาการพัฒนาผนังโพนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการลดความร้อนเหล็ก (สกนธ์ สิริวิไลสกุลวงศ์, 2545) วิทยานิพนธ์ เรื่อง การลดความร้อนด้วยการศึกษาการใช้หลังคาสองชั้น (พงษ์ศักดิ์ ลอยฟ้า, 2550) วิทยานิพนธ์ เรื่อง ฉนวนกันความร้อน (เปรมวิภา สิริปัญญานนท์, 2559) รวมไปถึงการศึกษาเกี่ยวกับระบบการกักสปีที่แตกต่างกันของวัสดุแผ่นเหล็กรีดลอนว่ามีสมณะการใช้งานและประสิทธิภาพด้านพลังงานของแผ่นหลังคาเหล็กอย่างไร (ธนพล ไคร้งาม, 2562) อีกทั้งศึกษาการใช้ฉนวนกันความร้อนเพื่อใช้ในการคุณสมบัติกันเสียงของวัสดุแผ่นรีดลอน (ปรมาภรณ์ พูลสวัสดิ์, 2560) ซึ่งจะชี้ให้เห็นสถานะและช่องว่างองค์ความรู้เกี่ยวกับเหล็กรีดลอนที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบ รูปทรงหลังคา ซึ่งมีความสำคัญในการเลือกใช้ให้เหมาะสมเพื่อคุ้มค่า เหมาะสมแก่การเลือกใช้

โดยผู้วิจัยได้แบ่งหมวดการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยเป็น 3 หมวด ดังนี้ แผ่นเหล็กรีดลอนที่ทำหลังคาโค้งในประเทศไทยในปัจจุบัน มีการศึกษาวิจัยเรื่อง การวิเคราะห์หลังคาโค้งไร้โครงถักช่วงยาว 30 เมตร (ฉัตร สุจินดา, 2550) เป็นงานวิจัยที่เผยแพร่เป็นบทความวิชาการ ที่กล่าวถึงการนำแผ่นเหล็กรีดลอนมาใช้ทำหลังคาโค้งไร้โครงสร้างในประเทศไทย โดยวิธีการทำการทดสอบการรับน้ำหนักตัวอย่างขนาดเท่าของจริงเปรียบเทียบกับข้อมูลทางเรขาคณิตของโครงสร้างที่ใช้ในแบบจำลอง โดยผลการวิจัยได้ทำนายค่าเคลื่อนตัวของแนวดิ่ง จากการศึกษาพบว่าในปัจจุบันสามารถหำระยะความห่างเสาได้มากที่สุดถึง 30 เมตร ซึ่งความท้าทายของหลังคาประเภทนี้ คือ หลังคาจะต้องได้รับการออกแบบให้รับน้ำหนักได้เองทั้งหมด

โดยการผลิตเหล็กกรีดลอนแล้วพับขึ้นเป็นตัวยู ซึ่งมีลักษณะแผ่นหลังคาแตกต่างจากหลังคาเหล็กกรีดลอนโดยทั่วไปและไม่ได้ใช้ความสามารถในการแอ่นของวัสดุมาออกแบบหลังคาเหล็กกรีดลอนประเภทนี้ ทั้งนี้ พบการศึกษาวิจัยความสัมพันธ์ระหว่างความแอ่น-ความเค้นดัด และอัตราส่วนทางเรขาคณิตของแผ่นวัสดุเชิงประกอบเรียงชั้นแบบสมมาตรขอบสี่ด้านรองรับการยึดแน่น (กุลทรัพย์ ผ่องศรีสุข และคณะ, 2559) จากการศึกษาพบว่าค่าความแอ่นและความเค้นดัดและมีการแปรผันอัตราส่วนทางเรขาคณิตตั้งแต่ 1:1 เพิ่มขึ้นที่ละ 0.1 กระทั่งระยะการอ่านและความเค้นดัดมีค่า โดยใช้วิธีการคำนวณทำให้ทราบวาระการแอ่นกับอัตราส่วนทางเรขาคณิตมีความสัมพันธ์กัน ความเข้าใจค่าความสามารถการแอ่นของวัสดุโลหะแผ่นบาง อีกทั้งพบวิทยานิพนธ์ที่เกี่ยวข้องกับการนำความโค้งของรูปทรงเรขาคณิตมาใช้ในงานออกแบบสถาปัตยกรรม ที่ศึกษาเรื่องแนวทางการออกแบบและก่อสร้างสถาปัตยกรรมรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้งด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ : กรณีศึกษา การออกแบบศาลาอเนกประสงค์ (ธนัท ศักดานรเศรษฐ์, 2558) โดยผู้วิจัยเลือกรูปทรงเปลือกโค้ง พบว่าการก่อสร้างงานสถาปัตยกรรมรูปทรงเรขาคณิตยังมีข้อจำกัดและพบปัญหาในกระบวนการก่อสร้าง ศึกษาโดยวิธีการการนำเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติมาใช้ในการสร้างแบบจำลองพิมพ์สามมิติทดแทนด้วยวัสดุซีเมนต์ มีความแม่นยำ ทำให้ทราบว่าการจำลองด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติข้อจำกัดเรื่องขนาดตามความสามารถที่เครื่องพิมพ์

การศึกษาข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

วัสดุเหล็กกรีดลอนคุณสมบัติเฉพาะของวัสดุกับการแอ่น

แผ่นเหล็กมุงหลังคาทำจากโลหะจึงมีคุณสมบัติเฉพาะตัวด้าน ความยืดหยุ่น (elasticity) ความแข็ง (stiffness) ซึ่งความยืดหยุ่นของวัสดุนั้นคือ ความสามารถของวัสดุที่จะเปลี่ยนรูปเมื่อถูกกระทำด้วยแรงดัด ดึง หรือแรงอัด ทำให้เกิดหน่วยแรงขึ้นภายในเนื้อวัสดุ แต่จะสามารถกลับคืนสู่รูปเดิมเมื่อนำแรงที่กระทำออกจากวัสดุ ดังกล่าว (สิริศักดิ์ ปิโยธรสิริ, 2539) ซึ่งวัสดุแต่ละชนิดจะมีค่าพิกัดยืดหยุ่น (elastic limit) ของตัวเอง ซึ่งถ้าวัสดุถูกกระทำด้วยแรงที่เกินกว่าค่าพิกัดยืดหยุ่นดังกล่าว วัสดุจะเปลี่ยนรูปร่างไปอย่างถาวรหรือแตกหัก คุณสมบัติความยืดหยุ่นเกิดจาก ความเค้นและความเครียดของวัสดุ ดังนั้นทุกวัสดุจะมีค่ายังโมดูลัสยังที่ใช้เป็นค่าคงที่ไว้หาค่าพิกัดยืดหยุ่นดังกล่าว โดยเราเรียกค่าความยืดหยุ่นนี้ว่า การแอ่น ซึ่งหมายถึง การตรวจสอบกำลังของวัสดุจำเป็นต้องคำนึงถึงการเปลี่ยนรูปของวัสดุ เมื่อรับน้ำหนักจะเปลี่ยนรูปโดยการโก่งตัว (deflection) ทำให้แนวแกนที่เป็นเส้นตรงเปลี่ยนเป็นเส้นโค้งโดยเลื่อนตำแหน่งอยู่เหนือหรือใต้แนวเส้นตรงเดิม

การแอ่น เส้นโค้ง รูปทรงเรขาคณิต

เมื่อวัสดุเกิดการแอ่นตัวทำให้แนวแกนที่เป็นเส้นตรงเปลี่ยนเป็นเส้นโค้งในทางคณิตศาสตร์ อาจเรียกได้ว่าเป็น "ส่วนของเส้นโค้ง" หมายถึงส่วนหนึ่งของเส้นโค้งที่สามารถหาอนุพันธ์ได้ โดยเส้นโค้งแบ่งได้เป็นสองประเภท ได้แก่ เส้นโค้งเปิด คือเส้นโค้งที่ไม่มีจุดจบหรือไม่บรรจบกัน เช่น คลื่นรูปไซน์ พาราโบลา เส้นโค้งปิด คือเส้นโค้งที่บรรจบกันเป็นรูปปิดหรือลากทบรอยเดิมเป็นวงวน เช่น รูปวงกลม ไฮโปโทรคอยด์ (Salvadori, 1963 อ้างถึงใน ธนัท ศักดานรเศรษฐ์, 2558)

วิธีการหาความยาวส่วนโค้งของวงกลมที่เป็นเส้นโค้งแบบปิด โดยความยาวส่วนโค้งของวงกลม คือ ระยะจากจุดสิ้นสุดหนึ่งของส่วนโค้งนั้นไปที่จุดสิ้นสุดอีกจุดหนึ่ง เมื่อต้องการหาความยาวส่วนโค้ง จากทฤษฎีทางเรขาคณิตของวงกลม ตามสูตร ส่วนของเส้นโค้ง (arc length) คือดังนี้

$$arc\ length = 2\pi r \frac{\theta}{360}$$

ข้อมูลจากการศึกษา

สรุปข้อมูลจากแบบก่อสร้างของกรณีศึกษา

ในการวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเพื่อศึกษาสภาพปัจจุบันของหลังคาโค้งที่ใช้วัสดุเหล็กกริดลอนโดยศึกษาจากบริษัทที่ดำเนินการผลิตแผ่นเหล็กกริดลอน ผู้วิจัยได้ดำเนินการเก็บข้อมูลที่โรงงานโดยวิธีการสำรวจ สังเกตการณ์และสัมภาษณ์ รวมถึง กระบวนการวิเคราะห์การผลิตแผ่นหลังคาจากโรงงานผู้ผลิต

การวิจัยครั้งนี้เลือกอาคารที่ใช้วัสดุแผ่นเหล็กกริดลอนที่มีหลังคาโค้งเป็นกรณีศึกษาจำนวน 13 แห่ง เนื่องจากผู้วิจัยสามารถเข้าถึงข้อมูลได้ โดยศึกษาจากแบบก่อสร้าง ซึ่งแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ โครงการที่เจ้าของเป็นภาคเอกชน และโครงการที่เจ้าของโครงการเป็นภาครัฐ ซึ่งมีรายชื่อที่สรุปผลตามตาราง 1 ไว้ดังนี้

ตาราง 1 รายชื่อโครงการกรณีศึกษา จำนวน 13 อาคาร

ลำดับ	เจ้าของโครงการกรณีศึกษา	ออกแบบ	ชื่ออาคาร
1.	บริษัท ซูเปอร์โปรดักส์ จำกัด จังหวัดปทุมธานี	บริษัท พี.เอส.วาย.เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด	โรงงานและคลังสินค้า
2.	บริษัท สิงห์ เบเวอเรจ จำกัด จังหวัดนครปฐม	บริษัท บุญรอดบริวเวอรี่ จำกัด	อาคารคลังสินค้า
3.	การยาสูบแห่งประเทศไทย จังหวัดอยุธยา	บริษัท ดีไซน์ 103 อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด	อาคารศูนย์อาหาร
4.	บริษัท เลอครูเซ แมนูเฟคเจอร์ส ประเทศไทย จำกัด	บริษัท ชัชวาลย์-รอยัล แอสโคนิง จำกัด	โรงงานผลิต
5.	องค์การบริหารส่วนตำบลตากตก จังหวัดตาก	กองช่าง องค์การบริหารส่วนตำบลตากตก	อาคารอเนกประสงค์
6.	องค์การบริหารส่วนตำบลบ้านคั่ง จังหวัดอยุธยา	กองช่าง องค์การบริหารส่วนตำบลบ้านคั่ง	อาคารอเนกประสงค์
7.	โรงเรียนเทศบาลวารินวิชาชาติ จังหวัดอุบลราชธานี	กองช่างเทศบาลเมืองวารินธรวิชาชาติ	อาคารอเนกประสงค์
8.	เทศบาลตำบลเกษตรสมบูรณ์ จังหวัดชัยภูมิ	กองช่างเทศบาลเกษตรสมบูรณ์	อาคารอเนกประสงค์
9.	องค์การบริหารส่วนตำบลเพ็กใหญ่ จังหวัดขอนแก่น	กองช่างองค์การบริหารส่วนตำบลเพ็กใหญ่	อาคารอเนกประสงค์
10.	องค์การบริหารส่วนตำบลโนนทอง จังหวัดชัยภูมิ	กองช่างองค์การบริหารส่วนตำบลโนนทอง	อาคารอเนกประสงค์
11.	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์ จังหวัดนครสวรรค์	ราชภัฏนครสวรรค์	อาคารอเนกประสงค์
12.	องค์การบริหารส่วนตำบลบึงศาล จังหวัดนครนายก	กองช่าง องค์การบริหารส่วนตำบลบึงศาล	อาคารอเนกประสงค์
13.	เรือนจำกลาง จังหวัดลพบุรี	วิศวกรรมโยธา คงสิทธิ์ สุขโรจน์	อาคารอเนกประสงค์

สรุปข้อมูลกระบวนการผลิต

จากการศึกษาพบว่ากระบวนการผลิตแผ่นเหล็กกริดลอน ใช้เครื่องจักรเข้ามาเกี่ยวข้องในทุกกระบวนการ โดยก่อนการผลิตจะมีขั้นตอนการวิเคราะห์แบบ ซึ่งสามารถสรุปขั้นตอนการผลิตได้ 6 ขั้นตอน ดังสรุปไว้ในภาพ 1

ขั้นตอนที่ 1 การวิเคราะห์แบบเพื่อทราบรายละเอียดของแผ่นหลังคาที่จะผลิต โดยวิเคราะห์ร่วมกับข้อมูลของผลิตภัณฑ์แต่ละรุ่นก่อนการสั่งผลิต

ขั้นตอนที่ 2 ใบสั่งผลิตของแต่ละรุ่นผลิตภัณฑ์จะมีรายละเอียดที่แตกต่างกันตามความสามารถของรุ่นแผ่นผลิตภัณฑ์หลังคา ซึ่งทุกรุ่นที่มีรายละเอียดเหมือนกัน คือ ความยาวของแผ่นหลังคาที่มีความสำคัญมากที่สุด โดยใบสั่งผลิตจะถูกส่งไปพร้อมกับแบบที่ใช้ลงข้อมูลในใบสั่งผลิต

ขั้นตอนที่ 3 วางแผนการผลิตที่จะมีความเกี่ยวข้องกับหลายส่วนงาน ตั้งแต่ฝ่ายเตรียมวัตถุดิบเหล็กกริดเย็นที่มีความหนาที่แตกต่างกันและชั้นเคลือบที่แตกต่างกัน ทั้งการยืนยันวันรับสินค้าซึ่งเกี่ยวข้องกับการจัดการพื้นที่ในโรงงาน ก่อนการส่งครนยกม้วนเหล็กกริดเย็นเข้าเครื่องขึ้นรูปลอน

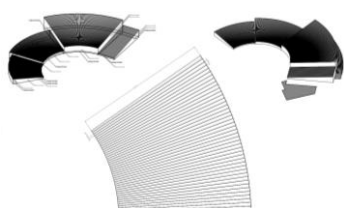
ขั้นตอนที่ 4 เมื่อม้วนเหล็กกริดเย็นถูกจัดวางในที่เตรียมการรีดหน้าเครื่องขึ้นรูปรีดลอน ทางพนักงานจะทำการส่งค่าการสั่งผลิตแผ่นเหล็ก โดยกำหนดความยาวแผ่นตามใบสั่งผลิต และเคลื่อนย้ายแผ่นเหล็กกริดลอนเพื่อเตรียม

ขนส่งไปที่หน้างานในกรณีลักษณะแผ่นตรงปกติ หากเป็นกรณีลักษณะแผ่นโค้งจะเตรียมเคลื่อนย้ายเข้าเครื่องตัดโค้ง ที่มีขั้นตอนที่มากกว่าแผ่นตรง

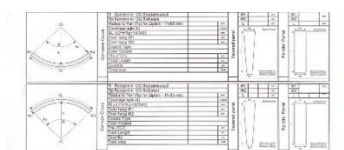
ขั้นตอนที่ 5 เมื่อแผ่นตรงที่ถูกตัดตามความยาวจากใบสั่งผลิต และนำมาจัดวางในที่เตรียมการรีดหน้าเครื่องตัดโค้ง ทางพนักงานจะทำการส่งค่ารัศมีความโค้งลงบนเครื่อง สามารถแบ่งได้ 2 แบบ คือ ตัดโค้งแบบมีรอยหยักที่แผ่นโค้ง และตัดโค้งแบบไร้รอยหยักที่แผ่นโค้ง

ขั้นตอนที่ 6 แผ่นโค้งถูกเคลื่อนย้ายและจัดวางเพื่อเตรียมขนส่งไปที่หน้างานก่อสร้าง โดยพบว่าการผลิตแผ่นโค้งในบางโครงการมีการส่งแผ่นไปทดสอบก่อนการผลิตจริง

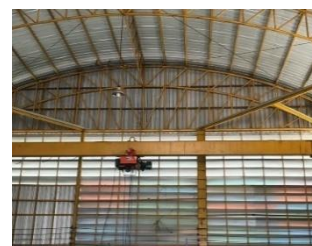
ขั้นตอนที่ 1 Shop drawing



ขั้นตอนที่ 2 ใบสั่งผลิตแผ่นหลังคา



ขั้นตอนที่ 3 เครนยกม้วนเหล็กรีดเย็น



ขั้นตอนที่ 4 เครื่องจักรขึ้นรูปลอน



ขั้นตอนที่ 5 เครื่องจักรตัดโค้ง



ขั้นตอนที่ 6 ขนส่งไป

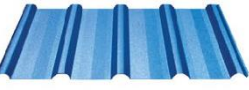


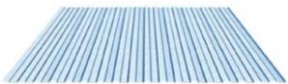
ภาพ 1 สรุปกระบวนการผลิตแผ่นหลังคาเหล็กรีดลอนแบบตัดโค้ง

ข้อจำกัดในการผลิตแผ่นโค้งตามคู่มือผลิตภัณฑ์

จากการศึกษาพบว่า การผลิตแผ่นเหล็กรีดลอนนั้นมีข้อจำกัดและความสามารถที่แตกต่างกัน โดยสามารถจำแนกได้ตามรุ่นของผลิตภัณฑ์ที่กล่าวในรายละเอียดของคุณสมบัติ โดยสรุปได้ตามตาราง 2

ตาราง 2 สรุปข้อมูลข้อจำกัดการผลิตแผ่นโค้งตามรุ่นผลิตภัณฑ์

ชื่อรุ่นแผ่นเหล็กรีดลอน	ความกว้างแผ่น (mm.)	ความสูงลอน (mm.)	ความหนา (mm.)	โค้งตัด (m.)	โค้งไม่ตัด (m.)
1. KL700 	700	39	0.42-0.60	0.70-50	≥ 50
2. Ultima Hi-Rib 	780	66	0.40-0.60	0.65-60	≥ 60
3. TD760 	760	29	0.35-0.60	0.45-60	≥ 60

ชื่อรุ่นแผ่นเหล็กยึดลอน	ความกว้างแผ่น (mm.)	ความสูงลอน (mm.)	ความหนา (mm.)	โค้งตัด (m.)	โค้งไม่ตัด (m.)
4.HR-29 	730	38	0.35-1.00	0.65-40	≥ 40
5. Trimmmax 	825	22.5	0.35-0.42	0.40-60	≥ 60
6.Panelrib 	850	4	0.35-0.42	-	≥ 7

ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบหลังคาโค้ง จะแบ่งออกเป็น 2 ความโค้งที่ใช้ในการจำแนกการผลิต ที่แสดงในตาราง 2 โดยโค้งตัดจะแสดงรัศมีที่เครื่องจักรสามารถตัดโค้งได้น้อยที่สุด-มากที่สุด และโค้งไม่ตัดจะแสดงรัศมีที่แผ่นเหล็กยึดลอนสามารถโค้งได้ตามธรรมชาติโดยไม่ต้องตัด ซึ่งมาจากการคำนวณความสามารถตามการแอ่นธรรมชาติของวัสดุที่จะทำให้เกิดเส้นโค้ง โดยคำนวณมาจากหน้าตัด ซึ่งแตกต่างกันที่ความกว้างรวมของแผ่นหลังชั้นรูปลอน ความสูงของลอนโดยมีชื่อเรียกตามรุ่นที่ต่างกัน ทั้งนี้ ยังรวมถึงตามความหนาของเนื้อเหล็กก่อนเคลือบ โดยในการศึกษาวิจัยครั้งนี้เลือกรุ่น TD760 ความหนาที่เนื้อเหล็กที่ 0.42 มิลลิเมตร

การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ข้อมูลรูปแบบอาคารทางสถาปัตยกรรม

การกำหนดรูปแบบอาคาร

จากการศึกษาได้จำแนกข้อคำนึงที่ส่งผลต่อการออกแบบอาคารแบ่งเป็นสามส่วน คือ ส่วนที่ 1 ที่ดินของโครงการ โดยรายละเอียดความกว้างและที่ตั้งของที่ดินจะถูกควบคุมส่งผลต่อการออกแบบอาคาร ประเภทอาคาร ความกว้างและความสูงของอาคารมีข้อจำกัดมาจากระยะร่น โดยต้องเป็นไปตามข้อกำหนดการควบคุมอาคาร ส่วนที่ 2 การใช้สอยในพื้นที่อาคารที่มีความแตกต่างกันแม้จะเป็นอาคารประเภทเดียวกัน ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับความต้องการใช้งานอาคารของเจ้าของโครงการ และส่วนที่ 3 ความงามเป็นสิ่งที่ผู้ออกแบบได้คำนึงถึงทุกโครงการ

ตาราง 3 การกำหนดรูปแบบอาคารกับข้อจำกัด 3 ด้านของอาคารกรณีศึกษา

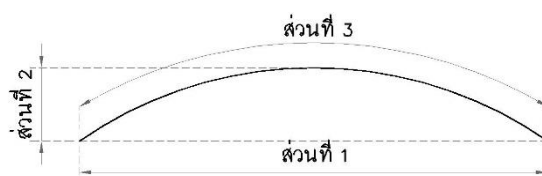
ลำดับ	ชื่ออาคาร	พื้นที่ (ตร.ม.)	กว้าง (เมตร)	ยาว (เมตร)	ที่ดิน	ใช้สอย	ความงาม
1.	อาคารโรงงานและคลังสินค้า	8,436	114	74	✓	-	✓
2.	อาคารคลังสินค้า	5,040	60	84	✓	✓	✓
3.	อาคารศูนย์อาหาร	1,925	35	55	✓	-	✓
4.	โรงงานผลิต	27,000	125	216	✓	✓	✓
5.	อาคารอเนกประสงค์	320	16	20	✓	-	✓
6.	อาคารอเนกประสงค์	690	23	30	-	-	✓
7.	อาคารอเนกประสงค์	1488	31	48	-	-	✓

ลำดับ	ชื่ออาคาร	พื้นที่ (ตร.ม.)	กว้าง (เมตร)	ยาว (เมตร)	ที่ดิน	ใช้สอย	ความงาม
8.	อาคารอเนกประสงค์	1,152	24	48	-	✓	✓
9.	อาคารอเนกประสงค์	144	24	6	✓	-	✓
10.	อาคารอเนกประสงค์	768	16	48	-	-	✓
11.	อาคารอเนกประสงค์	832	36	52	-	-	✓
12.	อาคารอเนกประสงค์	648	18	36	-	-	✓
13.	อาคารอเนกประสงค์	264	11	24	✓	-	✓

การคำนึงถึงความสวยงามของอาคาร โดยจากการศึกษาอาคารกรณีศึกษาทำให้เข้าใจได้ว่าด้วยข้อคำนึงดังกล่าวล้วนมีผลต่อการออกแบบอาคารตามลำดับความสำคัญของข้อคำนึงที่เป็นข้อจำกัดในโครงการ ตามตาราง 3 ข้างต้น

กำหนดความโค้งกับงานสถาปัตยกรรม

โดยเมื่อนำข้อคำนึงทั้งสามส่วน มาวิเคราะห์กับรูปแบบของหลังคาโค้งทำให้เข้าใจได้ว่าการกำหนดความโค้ง มาจาก 3 ส่วนที่มีความสัมพันธ์กัน คือ ส่วนที่ 1 ความกว้างมีความสัมพันธ์กับขนาดของที่ดินและพื้นที่ใช้สอย ส่วนที่ 2 ความสูงมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ใช้สอย และส่วนที่ 3 ส่วนของเส้นโค้งมีความสัมพันธ์กับความงาม ดังแสดงในภาพ 2



ภาพ 2 การกำหนดความโค้งมาจากสามส่วน

วิเคราะห์ข้อมูลเส้นโค้งที่ใช้ผลิตหลังคา

วิเคราะห์ความโค้งตัดและไม่ตัด

จากข้อจำกัดการผลิตแผ่นโค้ง ทำให้ทราบว่าแผ่นหลังคาตามรุ่นผลิตภัณฑ์จะระบุความสามารถในการผลิตแผ่นโค้งไม่ตัดจากรัศมีของความโค้ง โดยในแต่ละการผลิตโรงงานมีข้อพิจารณา 2 ส่วน คือ รัศมีและความยาวของแผ่นหลังคาโค้ง โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้รุ่นแผ่นเหล็กรีดลอน TD 760 ความหนาที่เนื้อเหล็ก 0.42 มิลลิเมตร โดยมีความสามารถโค้งไม่ตัดที่รัศมีมากกว่า 60 เมตร ตามที่ระบุในคู่มือผลิตภัณฑ์ มาใช้ในการวิเคราะห์โค้งตัดและโค้งไม่ตัดของอาคารกรณีศึกษาทั้ง 13 อาคาร โดยสรุปผลได้ว่า มีอาคารต้องใช้เครื่องตัด จำนวน 8 อาคาร และอาคารที่ไม่ต้องใช้เครื่องตัดจำนวน 5 โดยอาคารที่ใช้โค้งไม่ตัดล้วนมีรัศมีมากกว่า 60 เมตร ตามตาราง 4

ตาราง 4 การพิจารณาการผลิตหลังคาโค้ง

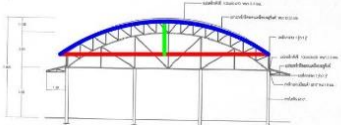
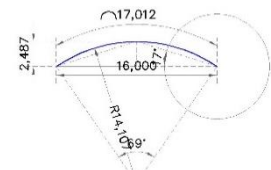
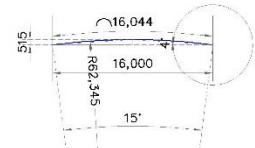
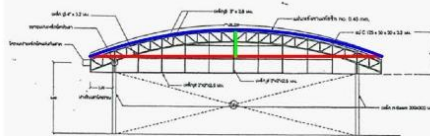
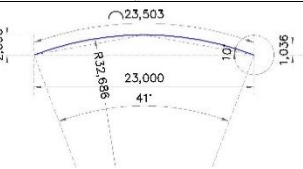
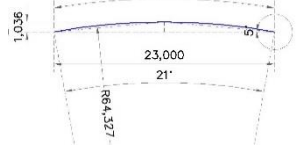
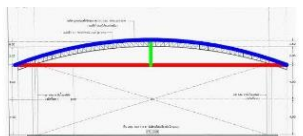
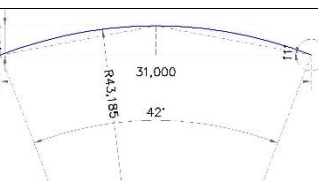
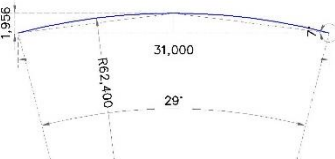
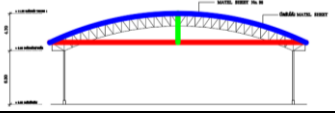
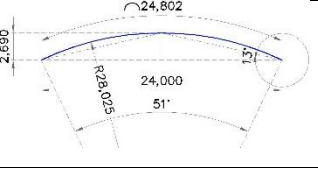
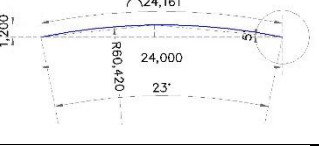
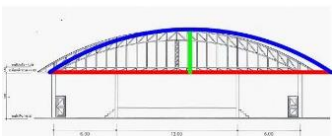
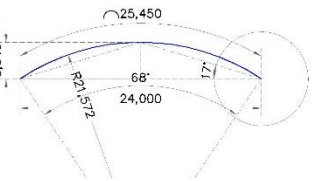
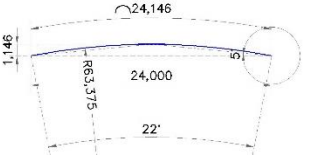
ลำดับ	ชื่ออาคาร	ความยาว	รัศมี	โค้งตัด	โค้งไม่ตัด
1.	อาคารโรงงานและคลังสินค้า	74.187	309	-	✓
2.	อาคารคลังสินค้า	51.172	208	-	✓
3.	อาคารศูนย์อาหาร	42.376	91	-	✓
4.	โรงงานผลิต	41.613	118	-	✓
5.	อาคารอเนกประสงค์	17.023	14.10	✓	-

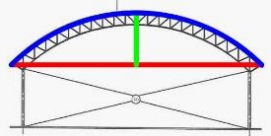
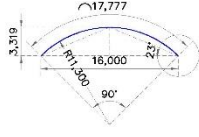
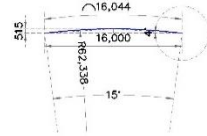
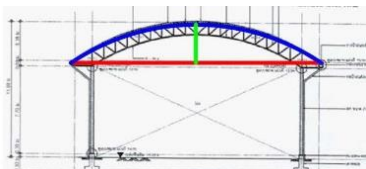
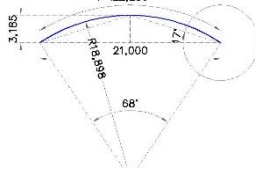
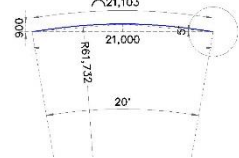
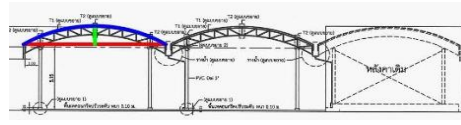
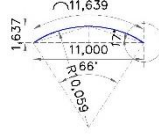
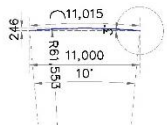
ลำดับ	ชื่ออาคาร	ความยาว	รัศมี	โค้งตัด	โค้งไม่ตัด
6.	อาคารอเนกประสงค์	23.503	32.68	✓	-
7.	อาคารอเนกประสงค์	31.707	43.18	✓	-
8.	อาคารอเนกประสงค์	24.802	28.02	✓	-
9.	อาคารอเนกประสงค์	25.450	21.57	✓	-
10.	อาคารอเนกประสงค์	17.77	11.30	✓	-
11.	อาคารอเนกประสงค์	37.333	80.56	-	✓
12.	อาคารอเนกประสงค์	22.266	18.89	✓	-
13.	อาคารอเนกประสงค์	11.639	10.05	✓	-

เปรียบเทียบ ก่อน-หลังปรับเส้นโค้งของอาคารกรณีศึกษา

จากแบบก่อสร้างของอาคารกรณีศึกษา พบอาคารที่ใช้โค้งตัด จำนวน 8 อาคาร ใช้เส้นโค้งมาวิเคราะห์ดังคอลัมน์ที่ 2 ของตาราง ปรับเส้นโค้งให้มีรัศมีมากกว่า 60 เมตร ดังคอลัมน์ที่ 3 ของตาราง จากกรณีศึกษาจาก 8 อาคารที่ใช้หลังคาโค้งแบบตัดที่แสดงในตาราง 5

ตาราง 5 ตารางเปรียบเทียบ ก่อน-หลังปรับเส้นโค้งของกรณีศึกษา 8 อาคารที่ใช้โค้งตัด

รูปแสดงเส้นโค้งจากแบบก่อสร้าง	เส้นโค้ง ก่อนปรับโค้งตัด	เส้นโค้ง หลังปรับโค้งไม่ตัด
อาคารกรณีศึกษา 1 โค้งตัด 		
อาคารกรณีศึกษา 2 โค้งตัด 		
อาคารกรณีศึกษา 3 โค้งตัด 		
อาคารกรณีศึกษา 4 โค้งตัด 		
อาคารกรณีศึกษา 5 โค้งตัด 		

รูปแสดงเส้นโค้งจากแบบก่อสร้าง	เส้นโค้ง ก่อนปรับโค้งตัด	เส้นโค้ง หลังปรับโค้งไม่ตัด
อาคารกรณีศึกษา 6 โค้งตัด 		
อาคารกรณีศึกษา 7 โค้งตัด 		
อาคารกรณีศึกษา 8 โค้งตัด 		

วิเคราะห์โค้งตัดกับค่าทางเรขาคณิต

จากการพิจารณาข้อมูลค่าทางเรขาคณิตของอาคารกรณีศึกษาที่ต้องใช้เครื่องตัด เปรียบเทียบค่าก่อนและหลังปรับเส้นโค้งของ 8 อาคาร ความโค้งของแต่ละโครงการกรณีศึกษา นำมาขึ้นรูปเส้นโค้งและระบุเส้นบอกขนาดที่เกี่ยวข้องกับเส้นโค้ง คือ รัศมีของเส้นโค้ง ความยาวของเส้นโค้ง และมุมของเส้นโค้ง ทำให้เห็นว่าเมื่อรัศมีเพิ่มขึ้น มุมลดลง รวมถึงความยาวเส้นโค้งจะลดลงเช่นเดียวกัน ซึ่งตรงกันข้ามกับรัศมีที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของเส้นโค้ง ทั้งนี้ ค่าระดับความกว้างของเส้นโค้งที่วัดจากระยะส่วนปลายของเส้นโค้งทั้งสองฝั่ง และความสูงที่วัดจากส่วนปลายของเส้นโค้งทั้งสองฝั่งถึงระยะส่วนที่สูงสุดของเส้นโค้ง โดยความกว้างจะยังคงที่และความสูงจะลง ซึ่งตรงกันข้ามกับรัศมีที่เพิ่มขึ้น ตามตาราง 6

ตาราง 6 เปรียบเทียบค่าทางเรขาคณิตเส้นโค้ง ก่อน-หลังปรับ รัศมีมากกว่า 60 เมตร

ลำดับ	โค้งตัด					โค้งไม่ตัด				
	รัศมี	มุม	เส้นโค้ง	กว้าง	สูง	รัศมี	มุม	เส้นโค้ง	กว้าง	สูง
1.	14.10	69	17.023	16.00	2.487	62.34	15	16.044	16.00	0.515
2.	32.68	41	23.503	23.00	2.090	67.32	21	23.124	23.00	1.036
3.	43.18	42	31.707	31.00	2.878	62.40	29	31.328	31.00	1.956
4.	28.02	51	24.802	24.00	2.690	60.42	23	24.161	24.00	1.200
5.	21.57	68	25.450	24.00	3.646	63.37	22	21.146	24.00	1.146
6.	11.30	90	17.77	16.00	3.648	62.33	15	16.044	16.00	0.515
7.	18.89	68	22.266	21.00	3.185	61.73	21	21.103	21.00	0.900
8.	10.05	66	11.639	11.00	1.637	61.55	10	11.015	11.00	0.246

วิเคราะห์ราคาโค้งตัดและราคาโค้งไม่ตัด

จากการศึกษาราคาแผ่นโค้งตัด ทั้ง 8 อาคาร มีราคาดังนี้ 300, 320, 340, 380 และ 400 เหล็ยตารางเมตรละ 350 บาทต่อตารางเมตร ตามตาราง 7

ตาราง 7 ราคาไค้ดัด

ลำดับ	ชื่ออาคาร	พื้นที่	ราคารวมไค้ดัด	ราคาต่อหน่วยไค้ดัด/ตร.ม.
1.	อาคารอเนกประสงค์	320	121600	380
2.	อาคารอเนกประสงค์	690	234600	340
3.	อาคารอเนกประสงค์	1488	446400	300
4.	อาคารอเนกประสงค์	1,152	368640	320
5.	อาคารอเนกประสงค์	144	57600	400
6.	อาคารอเนกประสงค์	768	245760	320
7.	อาคารอเนกประสงค์	648	220320	340
8.	อาคารอเนกประสงค์	264	105600	400

จากการศึกษาราคาแผ่นไค้ดัดไม้ใช้เครื่องตัด ทั้ง 5 อาคาร มีราคาดังนี้ 200, 210, 240 เฉลี่ยตารางเมตรละ 226 บาทต่อตารางเมตร ตามตาราง 8

ตาราง 8 ราคาไค้ดัดไม้

ลำดับ	ชื่ออาคาร	พื้นที่	ราคารวมไค้ดัด	ราคาต่อหน่วยไค้ดัด/ตร.ม.
1.	อาคารโรงงานและคลังสินค้า	8,436	1,771,560	210
2.	อาคารคลังสินค้า	5,040	1,108,800	220
3.	อาคารศูนย์อาหาร	1,925	462,000	240
4.	โรงงานผลิต	27,000	5,400,000	200
5.	อาคารอเนกประสงค์	832	216,320	260

จากตารางราคาแผ่นเหล็กที่รื้อถอนทั้งสองตาราง จะเห็นได้ว่าราคาขายต่อตารางเมตรแต่ละโครงการจะราคาไม่เท่ากัน โดยราคาสูงหรือต่ำ ปัจจัยสำคัญขึ้นอยู่กับขนาดพื้นที่ของหลังคาอาคาร อาคารที่มีพื้นที่มาก ราคาจะยิ่งต่ำ อาคารที่มีพื้นที่น้อย ราคาจะยิ่งสูง ทั้งนี้ ยังมีปัจจัยแวดล้อมอื่น ๆ เป็นตัวกำหนดด้วยเช่นกัน เช่น กลุ่มลูกค้า ลูกค้าประจำหรือลูกค้าจร ราคาต้นทุนเหล็กที่รื้อถอนในช่วงเวลาต่างกัน และการแข่งขันราคาของกลุ่มในแต่ละโครงการ เป็นต้น โดยเมื่อนำราคาแผ่นไค้ดัด และแผ่นไค้ดัดไม้ มาหาค่าความต่าง พบว่าแผ่นไค้ดัดจะมีค่าใช้จ่ายมากกว่าแผ่นไค้ดัดไม้ 54%

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาหลังคาไค้ 13 อาคาร พบหลังคาไค้ดัดไม้ใช้เครื่องตัด 5 อาคาร และหลังคาไค้ที่ต้องใช้เครื่องตัด 8 อาคาร โดยนำเส้นไค้ดัดของหลังคามานำใช้วิเคราะห์ พบว่ารัศมีเส้นไค้ดัดไม้ใช้เครื่องตัด 5 อาคาร มีรัศมีมากกว่า 60 เมตร มีความกว้างอาคารมากกว่า 35 เมตร รัศมีเส้นไค้ดัดที่ต้องใช้เครื่องตัด 8 อาคาร มีรัศมีตั้งแต่ 10 เมตร แต่ไม่เกิน 60 เมตร มีความกว้างอาคารตั้งแต่ 10 เมตร แต่ไม่เกิน 35 เมตร

เมื่อปรับรัศมีเส้นไค้ดัดของ 8 อาคารที่ต้องใช้เครื่องตัด ให้มีรัศมีมากกว่า 60 เมตร สามารถทำได้โดยลดความสูงของหลังคา ที่วัดจากระยะส่วนปลายของหลังคาถึงระยะส่วนที่สูงสุดของหลังคา

จึงทำให้ทราบว่า เมื่อรัศมีมากขึ้นจะส่งผลกระทบต่อความสูงและโครงสร้างของหลังคาโดยตรง แต่ไม่กระทบกับความกว้างของหลังคา จะทำให้ต้นทุนของการผลิตแผ่นหลังคาลดลงเมื่อใช้หลังคาไค้ดัดโดยไม่ต้องตัด ทั้งนี้ ควรศึกษาข้อมูลผลิตภัณฑ์ก่อนระบุรุ่นและรัศมีของหลังคาแผ่นเหล็กที่รื้อถอน

บรรณานุกรม

- กันตัทธิต ทับสุวรรณ พาสินี สุนากร และชนิกานต์ ยิ้มประยูร. (2562, มกราคม-มิถุนายน). ประสิทธิภาพในการลดอุณหภูมิและ
 เสี่ยงรบกวนของระบบหลังคาเขียวบนหลังคาเหล็กกรีตลอน. *วารสารวิชาการสถาปัตยกรรมศาสตร์*
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 68, 99 -114.
- กุลทรัพย์ ผ่องศรีสุข, ณัฐพงษ์ กุลท้วม, และเอกรินทร์ ระลาธิ. (2559, มกราคม-มิถุนายน). ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการ
 แอน-ความเค้นดัด และอัตราส่วนทางเรขาคณิตของแผ่นวัสดุเชิงประกอบเรียงชั้นแบบสมมาตรขอบสี่ด้านรองรับ
 แบบยึดแน่น. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ.*, 9(1), 61-69.
- ฉัตร สุจินดา. (2548). การวิเคราะห์หลังคาโค้งไร้โครงถักช่วงยาว 30 เมตร. *วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยศรีปทุม*.
<http://dspace.spu.ac.th/handle/123456789/1605>
- ธนพล ไคร้งาม. (2562). *สมรรถนะการใช้งานและประสิทธิภาพด้านพลังงานของแผ่นหลังคาเหล็กที่มีระบบการเคลือบสี*
แตกต่างกัน [วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย]. Chulalongkorn University
Intellectual Repository (CUIR). <http://cuir.car.chula.ac.th/handle/123456789/69880>
- ธนัท ศักดานรเศรษฐ์. (2558). *แนวทางการออกแบบและก่อสร้างสถาปัตยกรรมรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้งด้วยเทคโนโลยี*
การพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ : กรณีศึกษา การออกแบบศาลาอเนกประสงค์. สำนักพิมพ์
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- ธีรชัย จันทรสกุล. (2559). *ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจในการเลือกใช้หลังคาเหล็กเมทัลชีทสำหรับบ้านพักอาศัยใน*
กรุงเทพมหานคร [วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, มหาวิทยาลัยนานาชาติแสตมฟอร์ด]. Digital Research
Information Center. <https://dric.nrct.go.th/Search/SearchDetail/293934>
- ปรมาภรณ์ พูลสวัสดิ์. (2560). *คุณสมบัติในการกันเสียงของแผ่นเหล็กมุงหลังคาด้วยวัสดุพอลิเมอร์ชนิดอีลาสโตเมอร์โฟม*
(ฉนวนยางดำ) [วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย]. Chulalongkorn University
Intellectual Repository (CUIR). <https://cuir.car.chula.ac.th/handle/123456789/59770>
- ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 1843 เรื่อง กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม แผ่นเหล็กมุงหลังคา. (2535, 29
 ธันวาคม). *ราชกิจจานุเบกษา*. เล่ม 109 ตอนที่ 163 หน้า 1 - 14.
http://www.fio.co.th/web/tisi_fio/fulltext/TIS1128-2535.pdf
- เปรมวิภา สิริปัญญานนท์. (2559). *ประสิทธิภาพการหน่วงความร้อนของวัสดุเปลี่ยนสถานะเมื่อใช้เป็นฉนวนหลังคาอาคารใน*
สภาพอากาศร้อนชื้น [วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย]. Chulalongkorn University
Intellectual Repository (CUIR). <http://cuir.car.chula.ac.th/handle/123456789/55746>
- พงษ์ศักดิ์ ลอยฟ้า. (2550). *การศึกษาประสิทธิภาพในการลดความร้อนของหลังคาโลหะด้วยการหลังคาสองชั้น [วิทยานิพนธ์*
ปริญญาโทบริหารบัณฑิต มหาวิทยาลัยศิลปากร]. Silpakorn University Repository : SURE.
<http://www.sure.su.ac.th/xmlui/handle/123456789/6025>
- ศรายุทธ ศรีทิพย์อาสน์. (2554). *บ้านและวัสดุก่อสร้างบ้าน. บ้านและสวน.*
- สกนธ์ ศรีวิไลสกุลวงศ์. (2545). *การพัฒนากระบวนการผลิตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการลดความร้อน [วิทยานิพนธ์ปริญญา*
มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยศิลปากร]. Silpakorn University Repository : SURE.
<http://www.sure.su.ac.th/xmlui/handle/123456789/5990>
- สิริศักดิ์ ปิโยธรสิริ. (2539). *กำลังวัสดุ (พิมพ์ครั้งที่ 5). ซีเอ็ดดูเคชั่น.*
- สุภาวดี บุญยฉัตร. (2557). *หลังคา อุปกรณ์ และการติดตั้ง. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.*

สุภาวดี รัตนมาศ. (2543). *หลังคาในงานสถาปัตยกรรม*. นุ้ยบุ๊คส์.

สุภาวดี รัตนมาศ. (2553). *หลังคา อุปกรณ์ และการติดตั้ง*. กลุ่มอุตสาหกรรมหลังคาและอุปกรณ์ สมาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย.

Mario Salvadori. (1963). *Architectural construction*. Prentice-Hall.